

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 05-059494

(43)Date of publication of application : 09.03.1993

(51)Int.Cl. C22C 38/00
C22C 38/50
G21B 1/00
G21C 5/00
G21C 5/00

(21)Application number : 03-222992

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 03.09.1991

(72)Inventor : KATO TAKAHIKO

IKEDA SHINZO

AONO YASUHISA

IZUMITANI MASAKIYO

NAKADA KIYOTOMO

MASAOKA ISAO

TAKAHASHI HEISHICHIROU

(54) AUSTENITIC STAINLESS STEEL EXCELLENT IN RADIATION INDUCED SEGREGATION RESISTANCE

(57)Abstract:

PURPOSE: To obtain a material in which radiation induced segregation in a neutron irradiation environment is prevented and deterioration in corrosion resistance and embrittlement are suppressed by adding specified amounts of one or more kinds among Ti, Zr, Hf, V, Nb and Ta to an austenitic stainless steel and limiting the content of C and N to specified value or below.

CONSTITUTION: An austenitic stainless steel contg., by weight, 15 to 18% Cr, 8 to 15% Ni or, in addition to the above, $\leq 3\%$ Mo and contg. $\leq 1\%$ Si and $\leq 2\%$ Mn is mixed with one or more kinds among >0.4 to 0.6% Ti, >0.2 to 1.14% Zr >0.2 to 2.24% Hf, >0.2 to 0.64% V, >1.0 to 1.17% Nb and >1.0 to 27% Ta, in which the content of C is limited to 0.001 to 0.03% and that of N to 0.001 to 0.1% and the balance Fe with inevitable impurities.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 20.08.1997

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 04.07.2000

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-59494

(43)公開日 平成5年(1993)3月9日

(51)Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
C 2 2 C 38/00	3 0 2 L	7217-4K		
38/50				
G 2 1 B 1/00		D 9014-2G		
G 2 1 C 5/00	GDB C	7808-2G		
	GDF C	7808-2G		

審査請求 未請求 請求項の数7(全 17 頁)

(21)出願番号 特願平3-222992

(22)出願日 平成3年(1991)9月3日

(71)出願人 000005108

株式会社日立製作所
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72)発明者 加藤 隆彦

茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 池田 伸三

茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 青野 泰久

茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(74)代理人 弁理士 鶴沼 辰之

最終頁に続く

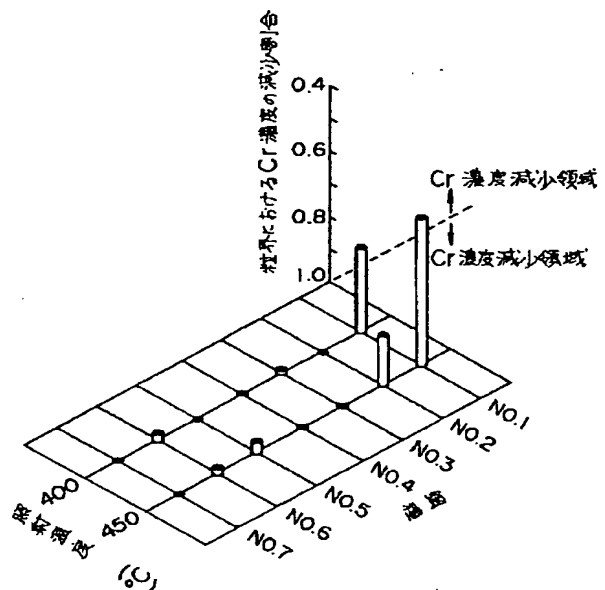
(54)【発明の名称】 耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼

(57)【要約】

【目的】 中性子照射環境下で耐食性があり、応力腐食割れや脆化を抑制できるオーステナイトステンレス鋼を提供する。

【構成】 Cr, Ni等を含むオーステナイトステンレス鋼に、重量比でTi:0.4%を超え0.6%、Zr:0.2%を超え1.14%、Hf:0.2%を超え2.24%、V:0.2%を超え0.64%、Nb:1.0%を超え1.17%およびTa:1.0%を超え2.27%以下のうちのいずれか1種の元素を添加し、また添加元素による照射誘起偏析の防止効果を保持するため、C含有量は0.001~0.03%、N含有量は0.001~0.1%に制限する。

【効果】 照射下で起きる結晶粒界での構成元素Cr, Ni等の照射誘起偏析を防止でき、材料の耐食性劣化、脆化を抑制することができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 重量比で、C：0.001～0.03%、Si：1%以下、Mn：2%以下、Cr：15～18%、Ni：8～15%を含有し、かつTi：0.4%を超え0.6%以下、Zr：0.2%を超え1.14%以下、Hf：0.2%を超え2.24%以下、V：0.2%を超え0.64%以下、Nb：1.0%を超え1.17%以下およびTa：1.0%を超え2.27%以下の1種以上を含有し、残部Fe及び不可避免の不純物元素からなることを特徴とする耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼。

【請求項2】 重量比で、C：0.001～0.03%、Si：1%以下、Mn：2%以下、Cr：15～18%、Ni：8～15%を含有し、かつTi：0.4%を超え0.6%以下、Zr：0.2%を超え1.14%以下、Hf：0.2%を超え2.24%以下、V：0.2%を超え0.64%以下、Nb：1.0%を超え1.17%以下およびTa：1.0%を超え2.27%以下の1種以上と、N：0.001～0.1%とを含有し、残部Fe及び不可避免の不純物元素からなることを特徴とする耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼。

【請求項3】 重量比で、C：0.001～0.03%、Si：1%以下、Mn：2%以下、Cr：15～18%、Ni：8～15%、Mo：3%以下を含有し、かつTi：0.4%を超え0.6%以下、Zr：0.2%を超え1.14%以下、Hf：0.2%を超え2.24%以下、V：0.2%を超え0.64%以下、Nb：1.0%を超え1.17%以下およびTa：1.0%を超え2.27%以下の1種以上を含有し、残部Fe及び不可避免の不純物元素からなることを特徴とする耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼。

【請求項4】 重量比で、C：0.001～0.03%、Si：1%以下、Mn：2%以下、Cr：15～18%、Ni：8～15%、Mo：3%以下を含有し、かつTi：0.4%を超え0.6%以下、Zr：0.2%を超え1.14%以下、Hf：0.2%を超え2.24%以下、V：0.2%を超え0.64%以下、Nb：1.0%を超え1.17%以下およびTa：1.0%を超え2.27%以下の1種以上と、N：0.001～0.1%とを含有し、残部Fe及び不可避免の不純物元素からなることを特徴とする耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼。

【請求項5】 0.1MeV以上のエネルギーを有する中性子が、 $5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 以上照射される環境で使用されることを特徴とする請求項1ないし4いずれかに記載の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼。

【請求項6】 原子炉圧力容器内に中性子源パイプ、炉心支持板、中性子計装管、制御棒挿入パイプ、シュラウド、上部格子板、燃料集合体被覆管及びチャンネルボッ

クスを構成物品として備えた原子炉において、前記構成物品の少なくとも1つが請求項1ないし4いずれかに記載の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼からなることを特徴とする原子炉。

【請求項7】 水冷構造を有する真空容器内にプラズマ側にセラミックタイルが設けられ水冷構造を有するダイバート及びプラズマ側にセラミックタイルが設けられ水冷構造を有する第1壁及びブランケットを備えた核融合炉において、該核融合炉の前記構成部品の少なくとも1つが請求項1ないし4いずれかに記載の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼からなることを特徴とする核融合炉。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、軽水炉、高速増殖炉、核融合炉等の炉構成材料用のオーステナイトステンレス鋼であって、特に中性子照射環境にさらされた時、結晶粒界での構成元素の濃度変化すなわち照射誘起偏析を防止するに好適な耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来、軽水炉炉心の機器部品等には主として、オーステナイトステンレス鋼SUS304またはSUS316が使用されている。原子炉の運転期間中、炉心部の機器部品は中性子照射を受けるので、機器部品材料は耐照射性に優れたものが望まれている。材料の耐照射性で、特に重要な性質は照射脆化と照射下の応力腐食割れである。照射脆化については、例えば特許1323615号に見られるように、材料に微量の添加元素を含有させることにより改善されることが指摘されている。また、照射下の応力腐食割れ性については同様に微量元素を添加することにより改善されることが特開昭62-93075号公報に記載されている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、上記発明の従来技術においては、原子炉中で高い線量の中性子照射を被むることにより誘起される結晶粒界での構成元素の濃度変化に起因したオーステナイトステンレス鋼の耐照射脆化性及び照射下での対応力腐食割れ性劣化を認識していない。従って、添加元素の適切な量の検討もされていない。

【0004】 本発明は、照射下における結晶粒界での構成元素の濃度変化を防止するに好適な耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼を提供することを目的とする。

【0005】

【課題を解決するための手段】 上記目的を達成するために、本発明の第1の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼は、Feを主成分とし、重量比でC：0.001～0.03%、Si：1%以下、Mn：2%

10

20

30

40

50

以下、Cr:15~18%、Ni:8~15%を含有し、かつTi:0.4%を超え0.6%以下、Zr:0.2%を超え1.14%以下、Hf:0.2%を超え2.24%以下、V:0.2%を超え0.64%以下、Nb:1.0%を超え1.17%以下およびTa:1.0%を超え2.27%以下の1種以上を溶かし込み、その1種以上の元素による照射誘起偏析の防止効果を損なわないために、C:0.001~0.03%に制限して含有させたことを特徴とする。

【0006】また、本発明の第2の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼は、上記第1の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼を構成する元素に、さらに重量比でN:0.001~0.1%を限定して含有させ、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Taの元素による照射誘起偏析の防止効果を損なわないようにしたものである。

【0007】また上記目的を達成するために、本発明の第3の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼は、重量比でC:0.001~0.03%、Si:1%以下、Cr:15~18%、Ni:8~15%、Mn:2%以下、Mo:0~3%の範囲で含有し、かつTi:0.4%を超え0.6%以下、Zr:0.2%を超え1.14%以下、Hf:0.2%を超え2.24%以下、V:0.2%を超え0.64%以下、Nb:1.0%を超え1.17%以下およびTa:1.0%を超え2.27%以下の1種以上を含有し、残部Fe及び不可避免的不純物元素からなることを特徴とし、ここでTi、Zr、Hf、V、Nb、Taによる照射誘起偏析の防止効果を損なわないために、C:0.001~0.03%に制限している。

【0008】また本発明の第4の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼は、上記第3の耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼を構成する元素に、さらに重量比でN:0.001~0.1%を限定して含有させ、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Taによる照射誘起偏析の防止効果を損なわないようにしたものである。

【0009】

【作用】オーステナイトステンレス鋼の照射下で誘起されている結晶粒界での構成元素の濃度変化は、照射により材料中に導入された照射点欠陥すなわち空孔の移動と、格子間原子の粒界への移動に起因する。つまり構成元素Crは、空孔と相互作用することにより空孔の流れと逆向きに移動する交換機構により粒界から離れていく。また構成元素Niは、格子間原子と相互作用し、格子間原子に引きずられる機構により粒界に移動し、粒界で濃度上昇が起こる。またSi、不可避免的不純物元素であるPやS等も後者の引きずられる機構により移動し、粒界で濃度上昇が起る。

【0010】本発明は、上記の粒界での構成元素の濃度

変化を防止する方法として、これら構成元素Cr、Ni、Si、P、Sの駆動力となる点欠陥の量を減少させることを思いついた。さらに照射によって生成される点欠陥の量を減少させる方法とし、空孔と強く相互作用する元素の添加により空孔をその元素にトラップさせ、空孔と格子間原子との相互消滅を促進させる方法を考案し、種々の元素の添加と有効な添加量の検討を行った。

【0011】その結果、重量比でTi:0.4%を超え0.6%以下、Zr:0.2%を超え1.14%以下、Hf:0.2%を超え2.24%以下、V:0.2%を超え0.64%以下、Nb:1.0%を超え1.17%以下およびTa:1.0%を超え2.27%以下の1種以上を、Cr-Ni系またはCr-Ni-Mo系のオーステナイトステンレス鋼中に固溶させるように添加することにより、照射による粒界での構成元素の濃度減少または増加を防止できることを中性子照射の模擬試験として超高压電子顕微鏡を用いた電子照射試験により発見し、本発明をするに至った。

【0012】これら添加元素の働きは、上記のように、添加元素が照射により生成した点欠陥すなわち空孔を強くトラップすることにより格子間原子との相互消滅を促進させ、空孔及び格子間原子の量が著しく引き下げられるため粒界からのCrの移動や粒界へのNi等の移動を抑制するものと考えられ、その結果、照射下で誘起される粒界での構成元素の濃度変化防止を達成できたと考えられる。

【0013】また上記添加元素の効果は、CまたはNが多量に存在すると、CまたはNが粒界でCrの化合物を照射中に生成し、粒界でCr濃度減少が誘起されるため、CまたはNを各々0.03重量%または0.1重量%より引き下げないと、添加元素は有効な働きをしない。また、鋼の製造性及びコストの点からCまたはNの下限値は0.001重量%以上が好ましい。また上記Ti、Zr、Hf、V、Nb、Taの添加量はそれぞれ上記の最低値以下では上記効果が得られず、さらに最高値を超えると溶接性や加工性が悪化する他、オーステナイト構造が不安定となって粒界等でフェライト相やマルテンサイト相を生成し、原子炉内での割れを誘起することがあるので、上記の添加範囲でオーステナイトステンレス鋼中に固溶させる。なお、Tiは0.45~0.6%、Zrは0.25~0.5%、Hfは0.24~0.90%、Vは0.25~0.50%、Nb:1.05~1.17%、Ta:1.05~1.50%がそれぞれ好ましい。

【0014】また、他の成分元素では耐照射性、強度、耐食性を考慮して下記の重量範囲内とする。

【0015】Si:1%以下

Siは鋼の溶解の際、脱酸を完全にするため1%以下の範囲で添加でき、さらに耐照射脆化向上のため有効であるが、1%を越えると高温水中での応力腐食割れ性を害するので、1%以下が好ましい。

【0016】Mn：2%以下

添加しなくても上記機器部品材料として使用できるが、さらに強度や加工性向上のため添加することが好ましい。しかし2%を越えると逆に脆化をもたらすので、2%以下とする。より良好な加工性を付与するには、1～2%がより好ましい。

【0017】Cr：15～18%

Crは15%より低いと耐食性及び強度が低下し、18%を越えると耐照射性が低下し、また照射中に機械的性質に有害な σ 相を生成するので、15～18%とすることが好ましい。なお、材料中の組成のゆらぎによる σ 相の発生を極力抑制するためには、15～17.5%がより好ましい。

【0018】Ni：8～15%

Niは耐食性、照射下でのオーステナイト相安定性及び耐照射性から8～15%が望ましい。特にオーステナイト相安定化元素であるC量を上記理由から低く制限する必要があるため、オーステナイト相の安定化には12～

15%がより好ましい。

【0019】Mo：0～3%

Moは、添加しなくても上記機器部品材料として使用できるが、さらに耐食性及び強度の向上に配慮する場合に有効な添加元素である。しかし、3%を越えて添加すると δ 相の析出を促進し材料の脆化を引き起こすので好ましくない。 δ 相の析出を抑制し、かつ、より良好な耐食性及び強度を付与するには、2～3%の添加がより好ましい。

【0020】

【実施例】

〈実施例1〉表1は、本発明の実施例である耐照射誘起偏析に優れたオーステナイトステンレス鋼の鋼種No. 2、3、4、5、6、7で主成分のFe以外の化学組成（重量%）を、比較鋼の鋼種No. 1と共に示す。

【0021】

【表1】

表 1 供試材の化学組成 (wt%)

鋼種No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N	O	添加元素
1	0.003	0.01	1.65	0.002	0.003	13.9	17.7	2.2	0.017	0.0020	0.0131	無し
2	0.003	0.01	1.66	0.003	0.003	13.7	17.0	2.2	0.024	0.0019	0.0082	0.41Ti
3	0.003	<0.01	1.64	0.002	0.003	13.9	16.7	2.3	0.027	0.0079	0.0054	0.30Zr
4	0.004	0.01	1.63	0.003	0.003	13.8	16.7	2.2	0.023	0.0034	0.0041	0.24Hf
5	0.004	0.01	1.65	0.003	0.003	13.8	16.8	2.2	0.025	0.0018	0.0053	0.20V
6	0.003	0.01	1.64	0.002	0.003	13.8	17.0	2.2	0.030	0.0025	0.0076	1.01Nb
7	0.004	0.01	1.63	0.003	0.003	13.8	16.8	2.2	0.029	0.0028	0.0062	1.02Ta

【0022】No. 1はSUS316L鋼に相当する。No. 2、3、4、5、6、7は、本発明の添加量の範囲で、各々Ti、Zr、Hf、V、Nb又はTaを添加した鋼である。ここで各鋼のSi含有量が0.01%と少量となっているが、これは不可避免的に含むものである。これらの鋼は、真空溶精、10Kgインゴットに造塊後、1050℃で熱間圧延、次いで冷間圧延し、最終的に1000℃～1150℃で15～30分間溶体化処理を施して作製したものである。これらの鋼より電解研磨法で切り出した試料を、中性子照射を模擬した超高压電子顕微鏡内での電子照射により照射試験した。照射条

件は、電子の加速電圧1MV、照射量10dpa (1dpaは中性子照射量の約 1×10^{21} n/cm²に相当する)である。

【0023】図1及び図2は、各々照射によって結晶粒界で誘起されたCr濃度の減少割合及びNi濃度の増大割合を、各鋼種ごとに照射温度400、450℃で示した結果である。濃度分析はEDX分析によった。比較鋼No. 1に比べ、本発明鋼はいずれの温度でも照射誘起偏析(濃度変化)が著しく抑制された。ここで粒界でのCr、Niの濃度変化割合は照射後の粒界での濃度で割った値である。

【0024】〈実施例2〉表2は本発明のオーステナイトステンレス鋼No. 8、9、10と比較鋼No. 11、12で主成分のFe以外の化学組成を示す。

【0025】

【表2】

表 2 供試材の化学組成 (wt %)

鋼種No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N	O	添加元素
8	0.003	<0.01	1.64	0.002	0.003	13.9	16.7	2.3	0.027	0.0078	0.0067	0.78Zr
9	0.005	<0.01	1.62	0.002	0.002	13.8	16.6	2.2	0.023	0.0034	0.0033	0.90Hf
10	0.004	<0.01	1.66	0.003	0.003	13.9	16.9	2.2	—	0.0018	0.0187	0.28V
11	0.010	<0.01	1.65	0.003	0.003	13.8	17.3	2.2	—	0.0025	0.0094	0.49Nb
12	0.009	0.01	1.61	0.002	0.003	13.8	16.9	2.2	—	0.0028	0.0132	0.74Ta

【0026】これらの鋼は実施例1と同様の方法で作成した。さらに実施例1と同様の電子照射を500℃で実施し、結晶粒界近傍の濃度変化をEDX分析により調べた。図3及び図4は、各々Cr及びNi濃度の変化を示す結果である。ここで、実施例1で使用した比較鋼No. 1のSUS316Lと、Tiを添加した本発明鋼No.

2の500℃照射の結果も示した。比較鋼No. 11、12はNb、Taの添加量が少なく、無添加の比較鋼No. 1のSUS316Lと同等以上の照射誘起偏析（粒界でのCr濃度減少とNi濃度増大）が起っているが、本発明鋼No. 2、8、9、10はCr、Niいずれの照射誘起偏析も著しく抑制されていることがわかる。

【0027】また比較鋼No. 1、11、12では、照射により粒界の移動が起っており、これは照射で材料中に導入された点欠陥すなわち空孔と格子間原子の粒界への流れが著しいためと考えられる。これに対し、本発明鋼No. 2、8、9、10で粒界移動が起っていないことは、添加元素により空孔—格子間原子の相互消滅が促進され、粒界へのこれら点欠陥の流れが抑制されていることを示すもので、本発明の作用が明確に示されている一現象であると考えられる。

【0028】〈実施例3〉図5は、実施例1の比較鋼No. 1のSUS316Lを母合金として、Ti、Zr、Hf、V、Nb、Taを実施例1と同様の方法で溶解、作製し、これら元素がどこまで固溶するかを調べたX線回折の結果を示す。鋼種No. 13～18はそれぞれ上記元素を1種類ずつ添加されたもので、元素の添加量は、重量比でTi 0.6%、Zr 1.14%、Hf 2.24%、V 0.64%、Nb 1.17%、Ta 2.27%である。いずれの添加の場合も比較鋼No. 1のSUS316Lと同様にオーステナイト構造のピークしか観察されず、この範囲で全ての添加元素が固溶可能であることがわかる。これらの元素添加鋼は本発明鋼である。しかしこれ以上の量を添加すると、いずれの元素添加の場合も、フェライト相のピークが現われるため、脆化等の配慮から添加量は、図5に示した鋼の場合を最大量とするのが好ましい。

【0029】〈実施例4〉実施例1及び2で作製した本発明鋼No. 2、8、9、10、5、6の機械的性質を比較鋼No. 1と比較するため、引張試験を実施した。引張試験片サイズは全長50mm、平行部の長さ20mm、平行部断面形状2×2 (mm)、平行部端のR形状はR4である。図6は、室温で各鋼種につき2本ずつ引張試験を行って得た伸び、引張強さ、0.2%耐力の結果を示す。0.2%耐力はハッチングした棒の高さ、引張強さはハッチング部分とその上の白抜きの棒を加えた高さで表わした。0.2%耐力、引張強さは比較鋼No. 1と同等以上の値が、本発明鋼で得られる。また伸びに関して、Zrの添加鋼No. 2で約2割程度の減少がみられるが、原子炉内機器等の設計基準を十分にまわる良好な結果がいずれの元素を添加した場合にも得られ、本発明鋼の機械的性質が構造材として好良であることがわかる。

【0030】〈実施例5〉実施例4で述べた本発明鋼No. 2、8、9、10、5、6を20×1×1 (mm) 角

に切り出し、誘導加熱炉内で、メタン-水素混合ガス雰囲気中、1050℃で窒素を添加し、窒素含有量を約0.01, 0.10, 0.21wt%とした鋼を作製した。アルゴン中、1150℃で30min均質固溶化処理後、電頭試料を切り出して実施例1と同様の電子照射を実施した結果(500℃)、照射前昇温中及び電子照射中に、粒内および粒界に多量の窒化物が0.21wt%窒素添加材において形成され、粒界での構成元素の濃度変化は、比較鋼No. 1以上となった。この結果よりN含有量は0.1%を越えないことが好ましい。また、0.10%N添加材でも照射量が3dpaを越えると、同様の結果が得られるため高い照射線量を被むる部材への適用は好ましくない。この場合3dpa以下の照射量では、照射誘起偏析は抑制される。0.01%N添加材では10dpaの照射量でも全く問題なく実施例1(図1及び図2)と同様の結果が得られた。

【0031】〈実施例6〉実施例4で述べた本発明鋼No. 2, 8, 9, 10, 5, 6を20×1×1(mm)角に切り出し、誘導加熱炉で、アンモニア-水素雰囲気中、1050℃で炭素Cを添加し、0.03及び0.06wt% Cの試料を作製した。アルゴン中、1150℃、30minの均質固溶化処理後、電頭試料を切り出し、実施例1と同様の電子照射を実施した(500℃)。この結果、0.06wt% C含有材では結晶粒界近傍に炭化物が照射中形成し、10dpa照射後の粒界でのCr, Ni濃度変化は、比較鋼No. 1と同等以上となった。しかし、0.03wt% C含有材の場合は実施例1と同様に、Ti, Zr, Hf, V, Nb, Taの添加による照射誘起偏析防止効果は健全であった。従ってC含有量は0.03wt%以下とするのが好ましい。

【0032】〈実施例7〉次に本発明鋼が適用される装置例について説明する。図7は沸騰水型軽水炉(BWR)炉心部の要部欠陥概略斜視図である。図において、1は中性子源パイプ、2は炉心支持板、3は中性子計装管、4は制御棒、5はシュラウド、6は上部格子板である。これらの構造物及び機器は軽水炉炉心を構成するもので、中性子照射量が多く、また288℃、7MPaの高温高压水中下で用いられている。これら構造物及び機器を本発明による鋼で作製することにより、中性子照射下での粒界における構成元素の濃度変化が抑制され、照射下での耐食性、照射誘起SCC、粒界脆化の防止が計れる。図7に示すものの他に、これら構造物および機器間で使用されるパーツ等に本発明に係る鋼を用いることで、同様の効果が得られる。さらに沸騰水型以外の水冷却型原子炉の炉心部用構造物及び機器に本発明に係る鋼を用いることで同様の効果が期待できる。

【0033】前述の中性子源パイプ1、中性子計装管3、制御棒挿入パイプ及び燃料集合体7のチャンネルボックス及び燃料被覆管に実施例1～6の本発明鋼を用いることにより、耐中性子照射SCCに優れたものが得ら

れる。これらの部材は鋼塊より熱間加工及び溶体化処理後冷間加工と焼鈍の繰返しにより得られる。

【0034】また、炉心支持板2、シュラウド5、上部格子板6は本発明による鋼の鋼塊より熱間加工及び溶体化処理により得られる。更に、炉心は以下の機器により構成され、本発明に係る鋼はこれらの炉内構造物にも用いることができる。ここで炉内構造物は、上鏡スプレイノズル8、ベントノズル9、压力容器蓋10、压力容器フランジ11、計測用ノズル12、気水分離器13、シュラウドヘッド14、給水入口ノズル15、ジェットポンプ16、再循環水出口ノズル17、蒸気乾燥器18、蒸気出口ノズル19、給水スパーチャー20、炉心スプレイ用ノズル21、下部炉心格子22、再循環水入口ノズル23、バップル板24、制御棒案内管25等である。

【0035】また、本発明に係る鋼は炉内にインターナルポンプを設けた新型転換炉(ABWR)及び加圧水型原子炉(PWR)にも適用できる。ABWR炉内構造は前述のBWRのジェットポンプ16に代えて炉内にインターナルポンプを設けたものであり、他はBWRとほぼ類似している。従って、このABWRの炉内機器及び構造物に対し前述のBWRへの適用製品と同様に本発明に係る合金が前述と同様に適用される。本発明に係る合金を用いることにより安全性の高いものとすることができる。

【0036】図8はトカマク型核融合炉の概略断面図である。図において、31はダイバータ、32は第1壁および冷却パネル、35はブランケット、33は真空容器である。これらの構造物および機器はトカマク型核融合炉炉心を構成するもので、多量の中性子およびプラズマから漏洩する種々の粒子線の照射を受け、また冷却のために水に接する設計となっており、高温水と接触することになる。これらの構造物および機器を本発明による鋼で作製することにより、照射下で粒界の構成元素濃度の変化を防止でき、耐食性の向上を計れる。

【0037】これらのインバータ31、第1壁32及び真空容器33は水冷構造の本発明に係る鋼によって構成される。ダイバータ31、第1壁32は冷却構造の金属部材表面に低原子番号(例えばSiC, Si₃N₄, AlN, Al₂O₃、セラミックス)からなるブロックが機械的又は金属的に接合された構造を有する。これらに対しても本発明に係る鋼が用いられ、板材又はパイプによって構成される。

【0038】核融合装置は図示されていないが、トロイダルコイル34の他、ポロイダルコイル、真空排気装置を備えている。核融合装置には、他にオープン磁場系、慣性閉込めのレーザー加熱系があり、これらのタイプにも本発明に係る鋼が適用可能であり、高信頼性が得られる。

【0039】〈実施例8〉実施例7のBWR部品では、

約 $5 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 以上の中性子照射を 288°C 、 7 MPa の高温高压水環境下で被むることにより応力腐食割れが発生した。これらの部品はオーステナイトステンレス鋼 SUS304, SUS316, SUS316L 等で同様に起った。しかし実施例4で述べた本発明鋼 No. 2, 8, 9, 10, 5, 6 を用いて上記部品を作製し、同様の中性子照射をしたところ、 $1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ の中性子照射を行っても応力腐食割れが生じなかった。

【0040】〈実施例9〉実施例1ないし6で説明したオーステナイトステンレス鋼への Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta の添加は単独添加の効果を明らかにした例である。前述した様なこれらの元素の空孔との相互作用力は、オーステナイトステンレス鋼中におけるこれらの元素の大きさに依存していることを種々の検討から発見した。

表 3 316L 鋼中での添加元素のサイズファクター

Ω_{sf} : ボリュームサイズファクター

ℓ_{sf} : リニアサイズファクター

添加元素	Ω_{sf} (%)	ℓ_{sf} (%)
Ti	37.33	11.15
Zr	156.16	36.83
Hf	193.13	43.12
V	9.97	3.22
Nb	62.48	17.56
Ta	78.58	21.32

【0044】この大きさは $\text{Hf} > \text{Zr} > \text{Nb} > \text{Ti} > \text{V}$ の順であった。従って、これら元素の空孔との相互作用力はこの順で強く、その結果として点欠陥相互消滅量もこの順で大きい。

【0045】一方、添加元素のサイズファクターの増大に伴い、結晶粒内での二次欠陥（転移ループ、原子空孔集合体、ボイド等）の形成量が減少するため、二次欠陥形成に消費されて消滅する点欠陥量は、サイズファクターの増大とともに減少する。

【0046】上記の点欠陥相互消滅量と二次欠陥形成に消費される点欠陥量の和に比例して結晶粒界に流入する点欠陥は減少すると考えられるため、結局、サイズファクターの中程度の大きさをもつ Nb や Ta を添加したとき、粒界への点欠陥流入束がピークとなる。この結果、

【0041】図9は、SUS316L 鋼中の1原子が占める体積すなわち原子体積が添加元素の添加量でどのように変化するかを図5で示した様なX線回折結果から求めたものである。添加量の増大と共に該原子体積が直線的に増大することから、これら全ての元素は SUS316L 鋼の平均原子サイズよりも大きいオーバーサイズ元素であることがわかる。この結果より、空孔とこれら元素の相互作用力は、これら元素が SUS316L 鋼中で発現させる結晶格子を押し広げる弾性ひずみ場起因していることがわかった。

【0042】図9の直線の傾きより求めた定量的な SUS316L 鋼中での各元素の大きさ（サイズファクター）を表3に示す。

【0043】

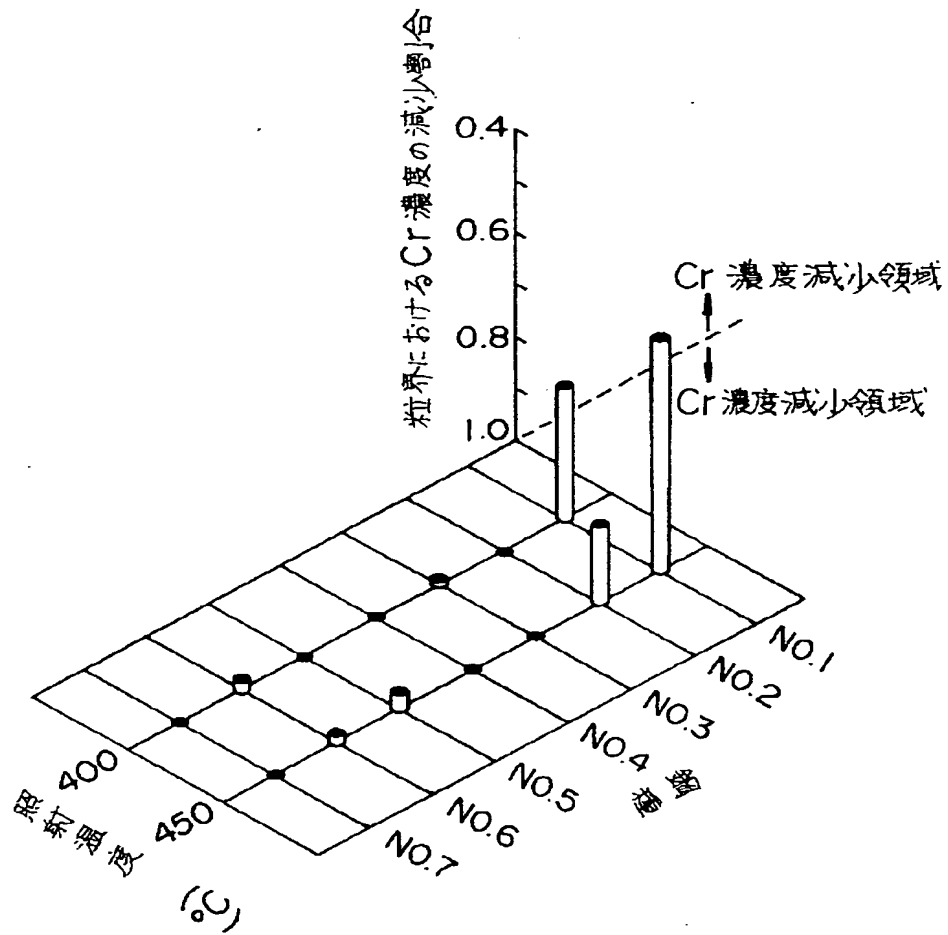
【表3】

図3及び図4に示すように、比較鋼 No.11 や No.12 それぞれの Nb 又は Ta 添加鋼で照射誘起偏析が増大する。

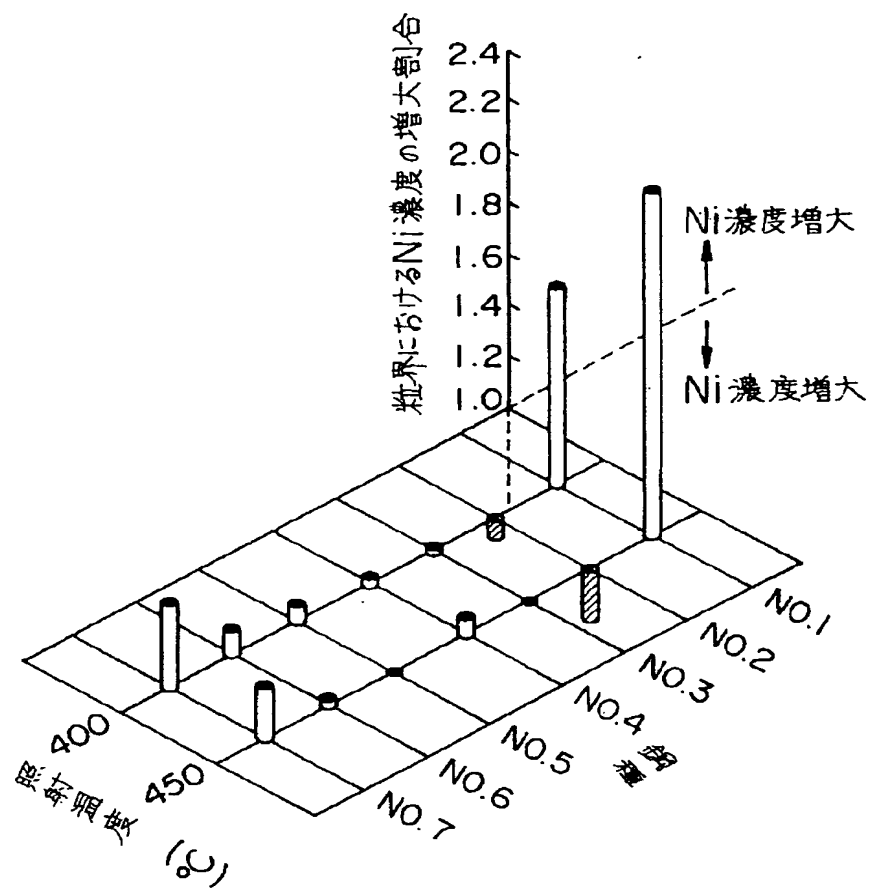
【0047】従って、照射誘起偏析を防止するにはサイズファクターの小さな V, Ti 又は逆に大きな Zr や Hf を添加する場合、最低添加量は少なくても効果があり、サイズファクターが中程度の Nb や Ta を添加する場合、最低添加量が多くなると効果が発現しない。

【0048】以上のことから、照射誘起偏析防止に効果の発現する最小添加量を検討した結果、次のようになった。即ち、重量比で最小添加量は、それぞれ Ti : 0.4%, Zr : 0.2%, Hf : 0.2%, V : 0.2%, Nb : 1.0%, Ta : 1.0% を超える量である。しかしながらその上限添加量は実施例3で述べた理由から

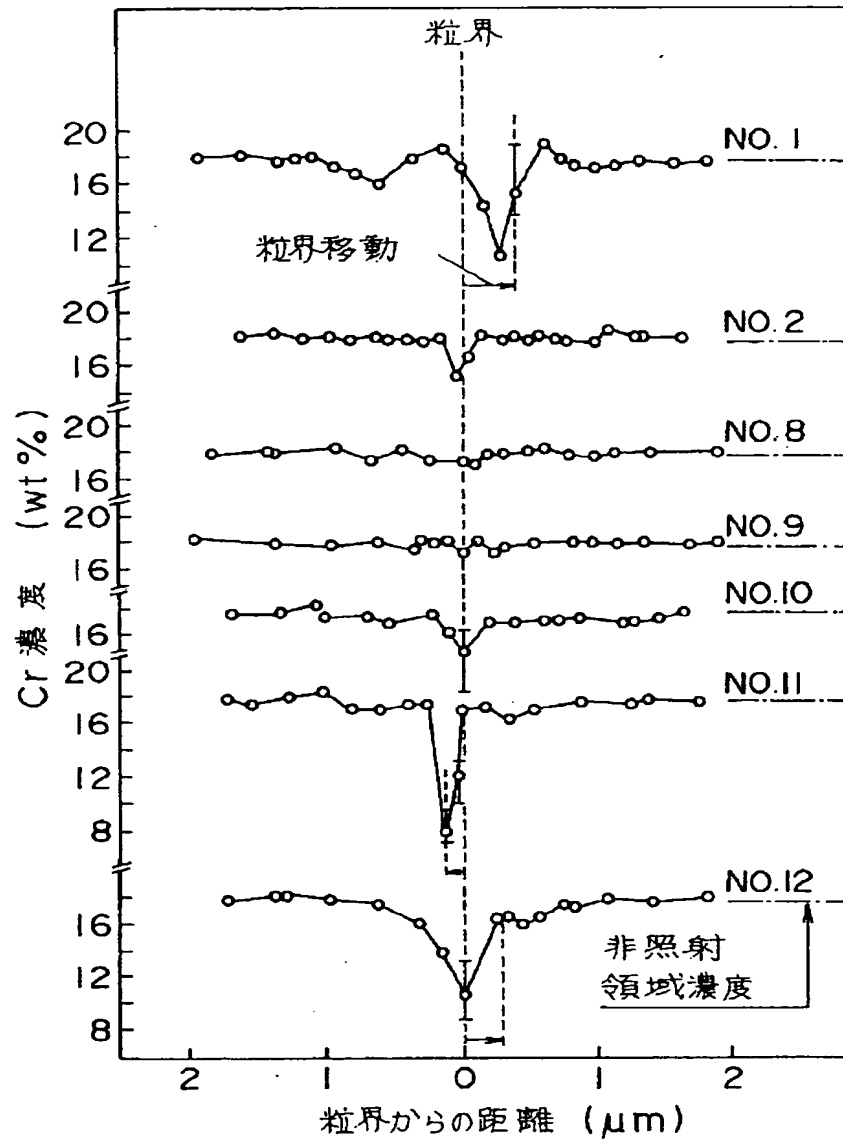
【図1】



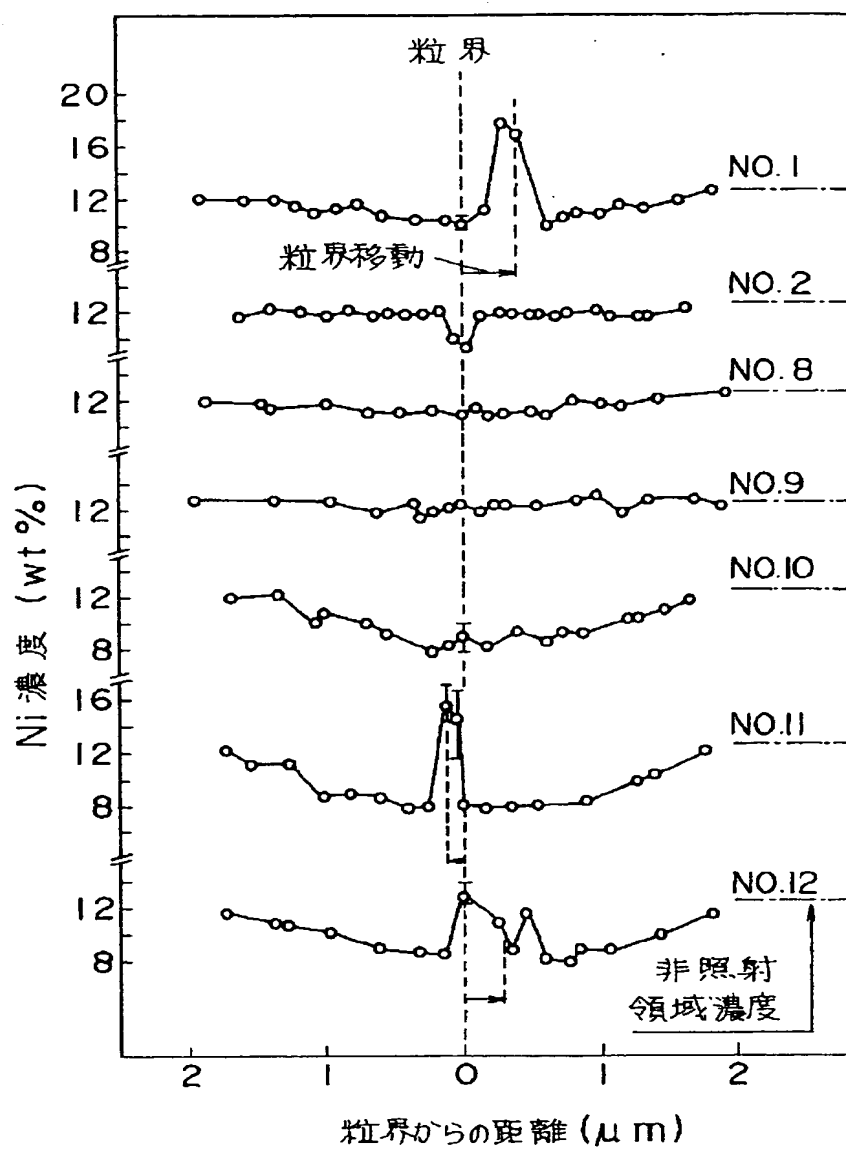
粒界におけるNi濃度の増大割合



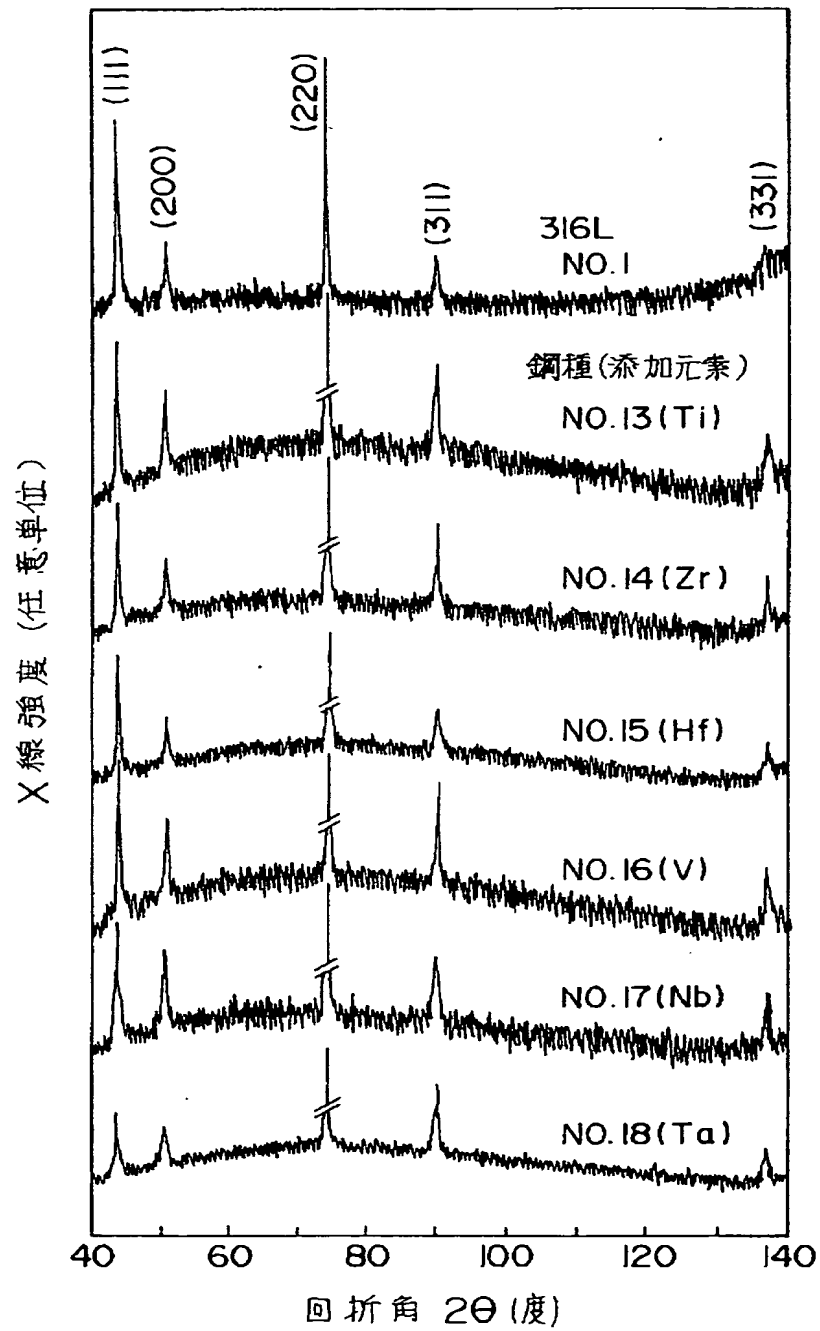
【図3】



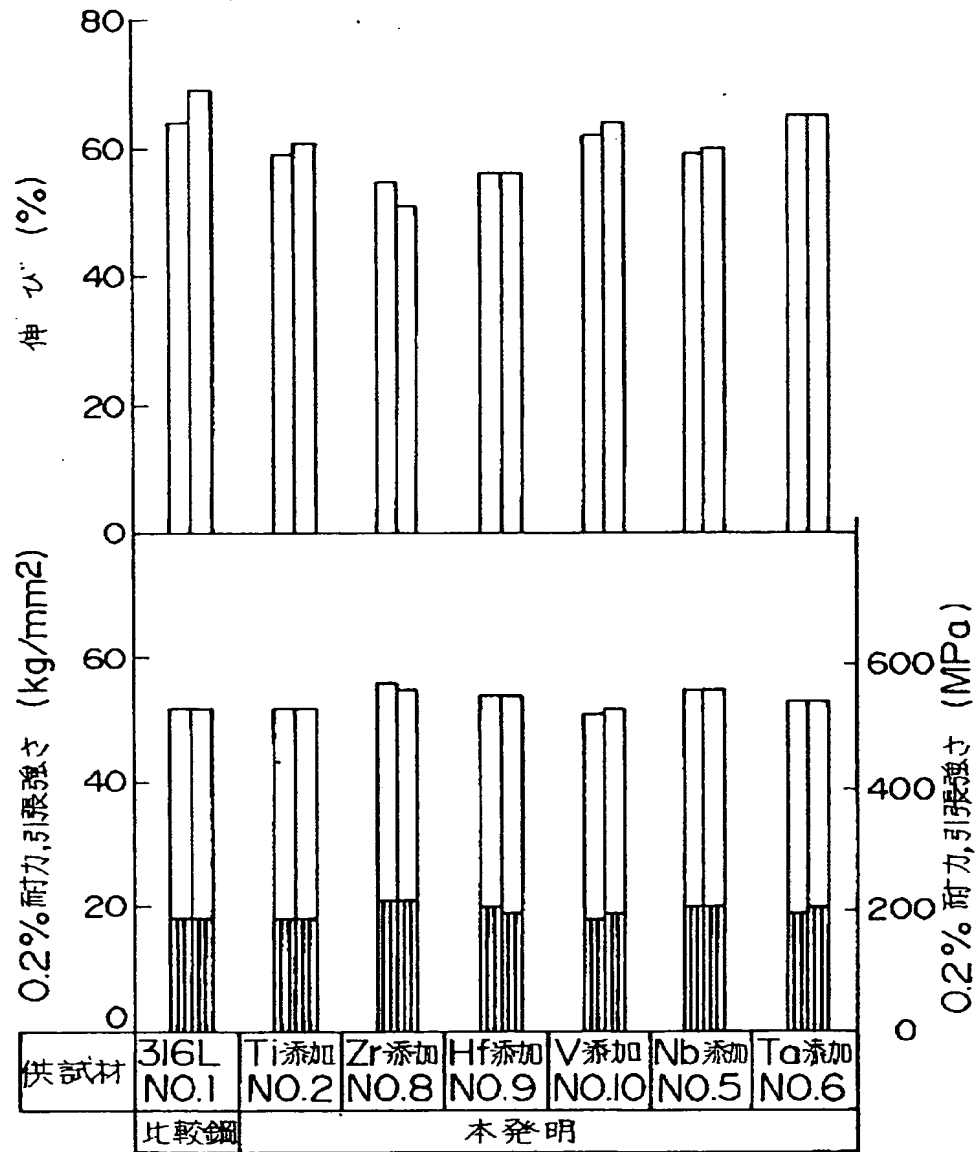
【図4】



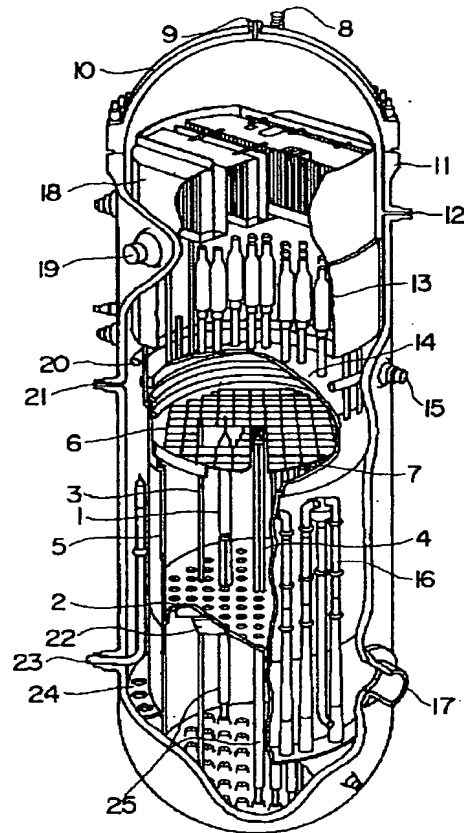
【図5】



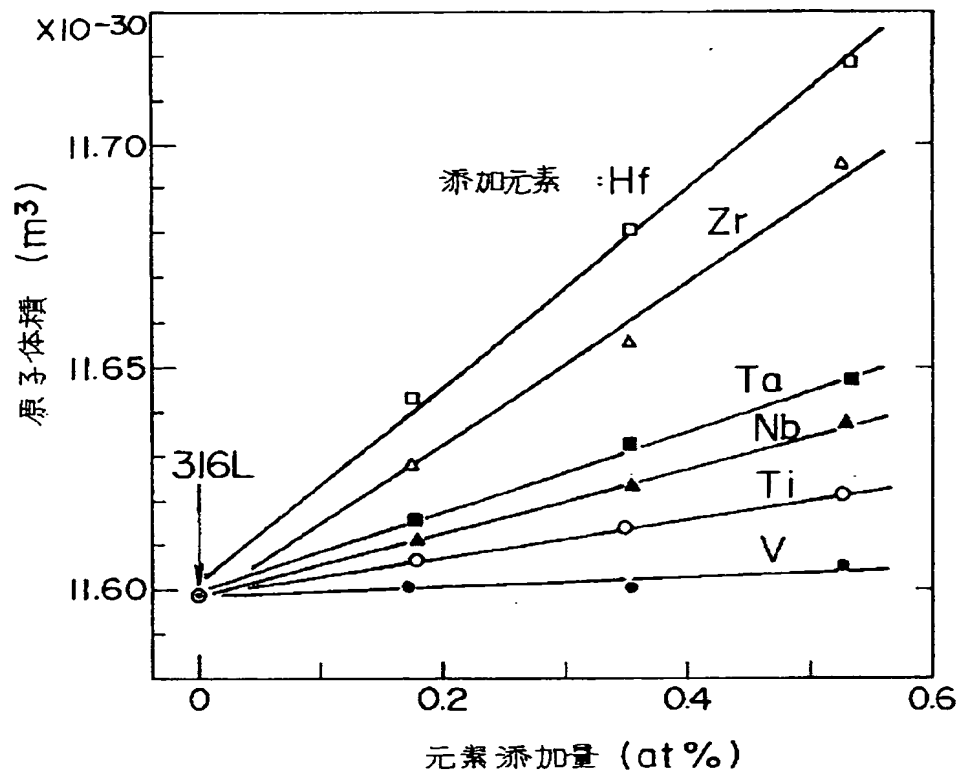
【図6】



【図 7】



【図 9】



フロントページの続き

(72)発明者 泉谷 雅清
茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 仲田 清智
茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 正岡 功
茨城県日立市久慈町4026番地 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 高橋 平七郎
北海道札幌市西区八軒四条二丁目1番1号